

複数の地震リスクマネジメント施策を 組み合わせたLCCに関する研究

福島誠一郎¹・矢代晴実²

¹東電設計株式会社 防災プロジェクト部
(〒110-0015 東京都台東区東上野3-3-3)

E-mail:fukushima@tepsco.co.jp

²東京海上火災保険株式会社 (〒100-8050 東京都千代田区丸の内1-2-1)
HARUMI.YASHIRO@tokiomarine.co.jp

企業の所有する建物や構造物は多くのリスクに囲まれており、地震リスクは、企業にとっては経営上無視できない。このため、企業経営者は、保有する建物や構造物について地震リスクマネジメントを実施し、地震リスクを定量化するとともに、耐震補強や地震保険等、複数の手法を組み合わせ、地震リスクの処理を適切に行う必要がある。本研究では「リスクの低減施策の効果とその費用の定量化」手法を提案する。また、提案した手法を用いて仮想の企業の保有する地震リスクを定量化し、ライフサイクルコスト最小化の観点から、リスクマネジメントで用いられているリスク移転の手法を取り入れた耐震性能レベルの設定の仕組みを検討する。

Key Words : Risk management, Seismic risk, Risk transfer, Seismic performance level, Life cycle cost

1. はじめに

企業の所有する建物や構造物は自然災害、事故、環境問題等多くのリスクに囲まれている。特に、日本では地震によるリスクが大きく、企業にとっては経営上無視できない。このため、所有建物の耐力を増すといったリスクマネジメント施策が実施されてきた。リスクマネジメント施策の内、耐震性能の向上は「リスクコントロール」と呼ばれ、既存建物の補強を含め、多くの研究や実施事例がある。また、耐震性能向上の目標に関しては、ライフサイクルコスト(LCC)を最小化することを条件とした「期待総費用最小化」の考え方が示されている^{1), 2)}。

ところで、リスクマネジメントにおける施策は様々で、前出のリスクコントロールに加え、近年の金融工学技術の発展に伴い、リスクを第三者に移転する「リスクファイナンス」と呼ばれる手法も自然災害に適用されつつある。複雑化・多様化しつつある企業の地震リスクを考えると、事前対策であるリスクコントロールと事後の経済的な補填であるリスクファイナンスを適切に組み合わせることが、企業のリスクマネジメントにとって重要である。

本研究では、リスクファイナンスを考慮したLCCの評価手法を提案し、LCC最小化の観点から最適なリスクコントロールとリスクファイナンスの組合せについて検討する。なお、リスクファイナンス手法としては、地震保険と証券化を用いる。

2. LCCに基づく耐震性能レベルの設定

(1) 評価の枠組み

LCCは建物の建設から撤去に至るまでの全ての費用を評価することを原則とする¹⁾。LCCは建物の耐震性能レベルの影響を受け、レベルが上がれば初期建設費用は増大し、地震リスクは低減する。建物の耐震性能レベルを変数として、これらの費用の総和を求め、それが最小となるような耐震性能レベルで設計することは「期待総費用最小化原理に基づく方法」として提案されている。

一般にLCCは下式で与えられる。

$$C(x, t) = I(x) + M(x, t) + R(x, t) + D(x) - B(x, t) \quad (1)$$

ここに、 x は耐震性能レベル、 t は供用期間であり、 C はLCC、 I は初期建設費用、 M は維持管理費用、 R は地震リスク、 D は撤去費用、 B は便益である。本研究では x は設計用標準せん断力係数とした。

ところで、維持管理費用、撤去費用、便益は建物の耐震レベルにはそれほど依存しないことが多い。そこで、議論を単純にするため、(1)式からこれらの費用を除く。さらに、リスク移転に要する費用 T を加え、(1)式を以下のように書き換える。

$$L(x, t) = I(x) + R(x, t) + T(x, t) \quad (2)$$

$R(x, t)$ と $T(x, t)$ は下式のように表した。

$$R(x, t) = t \times \alpha \times R'(x) \quad (3a)$$

$$T(x, T) = t \times [\beta \times T^1(x) + T^2] \quad (3b)$$

ここに、 $R'(x)$ は 1 年あたりの地震リスクである．また、係数 α は地震リスクに対する割増係数で、経営者の地震リスクに対する効用を反映させるために導入した． $T^1(x)$ は年期待地震保険支払額、 β はプレミアムである． T^2 は証券化に関わる費用で、元本と配当利率から移転費用が設定されるため、定数として扱うこととした．

地震保険ではリスク移転がない場合の予想最大損失³⁾ (PML) を引受限度額の上限とする．免責額についても損失の大きさと発生頻度からその値を設定することが現実的である．また、証券化における諸変数に関しても、リスク移転がない場合のリスクカーブを基に設定することになる．したがって、リスク移転は耐震性能レベル x と独立ではなく、(2) 式における T が x の関数であるのはこの理由による．

(2) リスク移転手法の組み込み

本研究では、図-1 に示す手順により、リスク移転を考慮した LCC 評価を行うこととした．また、リスク移転スキームとして、以下を設定した．

- ・スキーム 0：リスク移転なし
- ・スキーム 1：地震保険のみ
- ・スキーム 2：証券化にのみ
- ・スキーム 3：地震保険と証券化を併用

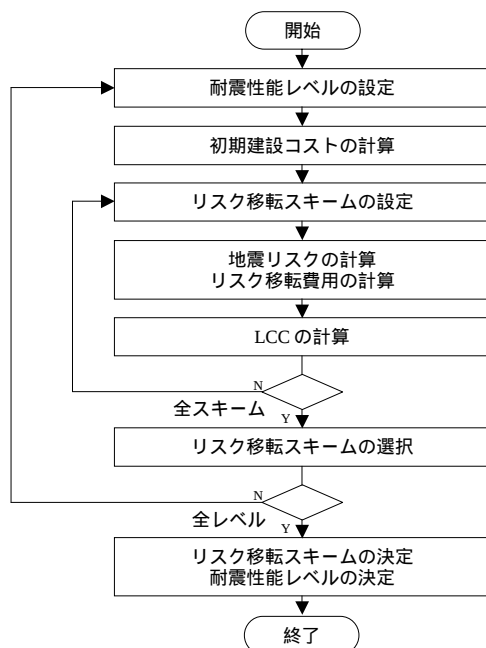


図-1 リスク移転を伴う耐震性能レベルの設定

3. 手法の適用

(1) 対象ポートフォリオ

関東地方に配置された 25 の建物からなるポートフォリオを設定した．建物資産額は 1 棟あたり 100 とした．建物群の配置を図-2 に示す．破線で囲んだ領域内の 10 棟の建物は、耐震性能レベル向上の対象となるものである．

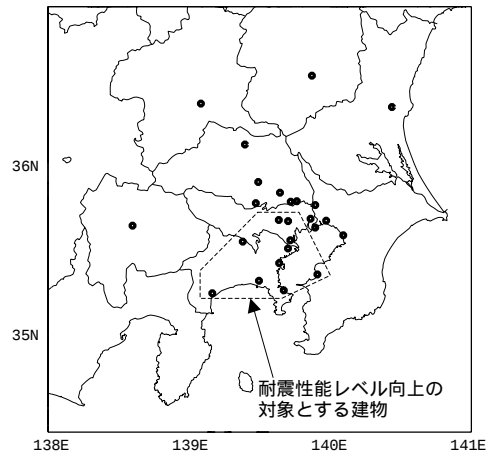


図-2 建物群の配置

(2) 建物の fragility と被害額

建物の fragility と被害率（建物価格に対する損失の比）に関しては、福島・矢代⁴⁾に基づき設定した．その結果を表-1 に示す．

表-1 被害程度別の fragility と被害率

被害程度	fragilityカーブの特性値		被害率 (%)
	中央値 (Gal)	対数標準偏差	
小破	160	0.4	5
中破	480	0.4	10
大破	800	0.4	30
倒壊	1120	0.4	100

(3) 地震環境

地震環境に関しては、福島・矢代⁵⁾に基づき設定した．大地震発生活動域は固有地震により、中小地震発生活動域については b 値モデルにより、それぞれモデル化した．距離減衰式についても同文献に従い、以下の安中式を採用した．

$$\log A = 0.61M + 0.00501h - 2.203\log(d) + 1.377 \quad (4)$$

$$d = (\Delta^2 + 0.45h^2)^{0.5} + 0.22\exp(0.699M)$$

ここに、 A は最大加速度、 Δ は震央距離、 h は震源深さ、 M はマグニチュードである．距離減衰式のばらつきを表す対数標準偏差は、自然対数で 0.5 と設定した．

(4) リスクファイナンスに関する諸元

前項までに示した条件を用いて、スキーム 0 のリスクカーブを評価し PML を求めた．得られたリスクカーブを図-3 に示す．PML の値はそれぞれ、344、256、213 と得られた．

地震保険の引受限度額は PML に依存するため、ここでは、複数の耐震性能を有するポートフォリオを設定した．ポートフォリオのリスク評価手法は、福島・矢代³⁾に従った．

解析ケース 1 は、表-1 に示した fragility を全建物に与えた場合である．解析ケース 2 と 3 は、図-2 に示した建物の内、破線で囲まれている建物について中央加速度耐力をそれぞれ 1.25 倍、1.5 倍にしたものである．ここで選定された地点は、関東

地震が支配的となる地点である．なお，中央加速度耐力は標準せん断力係数 x に比例すると仮定した．

PML を引受限度額の上限值として，表- 2 に示すような地震保険の諸元を設定した．なお免責額については，総資産（2500）の 2% とした．

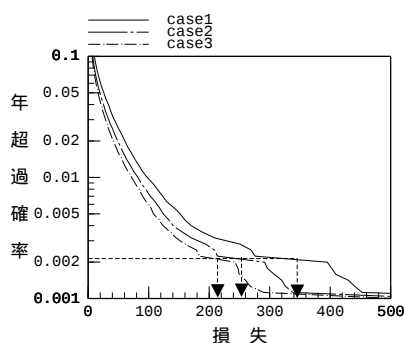


図- 3 リスク移転のない場合のリスクカーブ

表- 2 地震保険に関する諸元

定数	耐震性能レベルの向上（解析ケース）		
	1	2	3
免責額	0.02	0.02	0.02
引受限度額	0.14	0.10	0.08

数値は，総資産（2500）に対する比率

証券化において必要な諸元は，元本，元本没収率，グリッドである⁵⁾．元本は前述したように定数とし，解析ケース 1 における地震保険の支払限度額（引受限度額 - 免責額）を基に 300 と設定した．

グリッドについては，ポートフォリオの損失に寄与が大きいと考えられる南関東地域に位置する建物を含むこと，同じく寄与の大きい関東地震についての補填が行われること，の 2 つを条件として図- 4 に示すような 4 角形を設定した．

元本没収についてはグリッド内の大地震発生活動域の地震による損失補填を考える．そこで，マグニチュード 7.0 から元本の没収を開始し，8.0 で元本全額が没収されるような元本没収率関数を設定した．設定した元本没収率関数を図- 5 に示す．

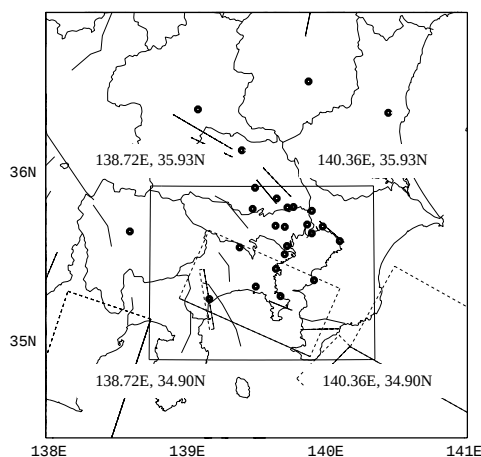


図- 4 証券化で用いるグリッド

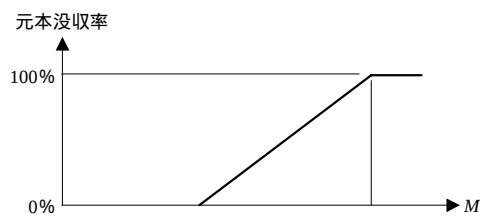


図- 5 設定した元本没収率関数

(6) 耐震性能レベルと費用の関係

新建築構造体系の開発¹⁾によれば，建設費と標準せん断力係数はほぼ線形関係であること，標準せん断力係数 x が 0.2 から 0.4 になれば建設費は約 20% 上昇することが示されている． $x=0.2$ のときの初期建設費用を 100 としたので，1 棟あたりの初期建設費用 I' は以下のように求められる．

$$I'(x) = 80 + 100x \quad (5)$$

これより，ポートフォリオの初期建設費用は以下となる．

$$I(x) = 2300 + 1000x \quad (6)$$

1 年あたりの地震リスク $R'(x)$ はリスクヘッジ側の年間期待損失（AEL）である．表- 3 にポートフォリオ解析の結果を示す．これを基に， x と $R'(x)$ の関係を以下のように設定した．

$$R'(x) = 1.11x^{-1.043} \quad (\text{スキーム 0}) \quad (7a)$$

$$R'(x) = 1.16x^{-0.846} \quad (\text{スキーム 1}) \quad (7b)$$

$$R'(x) = 1.20x^{-0.671} \quad (\text{スキーム 2}) \quad (7c)$$

$$R'(x) = 1.21x^{-0.744} \quad (\text{スキーム 3}) \quad (7d)$$

表- 3 リスクヘッジ側の AEL

リスク移転 スキーム	耐震性能レベルの向上（解析ケース）		
	1	2	3
0	6.00	4.63	3.94
1	4.47	3.71	3.23
2	3.57	3.01	2.72
3	4.02	3.36	2.98

1 年あたりの保険料はリスクテイク側の AEL にプレミアムを乗じたものである．表- 4 にポートフォリオ解析の結果を示す．これを基に，スキーム 1 についての x と $T^1(x)$ の関係を以下のように設定した．

$$T^1(x) = 0.0965x^{-1.707} \quad (\text{スキーム 1}) \quad (8a)$$

一方，スキーム 2 に関するリスク移転費用は，元本に利率 γ を乗じ，以下のように設定した．

$$T^2 = 300\gamma \quad (\text{スキーム 2}) \quad (8b)$$

スキーム 3 については，(8a)式と(8b)式の平均を用いてリスク移転費用を求める．

表- 4 リスクテイク側の AEL

リスク移転 スキーム	耐震性能レベルの向上（解析ケース）		
	1	2	3
0	-	-	-
1	1.53	0.92	0.71
2	2.43	1.62	1.20
3	1.98	1.27	0.96

なお、地震保険についてはプレミアムを、証券化については元本の利率を設定する必要がある。プレミアムは再保険市場の状況によって大きく変わらうが、ここでは米国における事例に基づき、 $\beta=6$ を採用した。また、証券化における元本の利率はLIBOR (London Inter-Bank Offered Rate: ロンドン銀行間取引利率) + 3%とし、LIBOR については2.5%を採用した。

(7) 最適リスクマネジメント施策

図-6 に t と α の組合せに対する最適なリスク移転スキームを、図-7 に対応する最適な耐震性能レベルを示す。

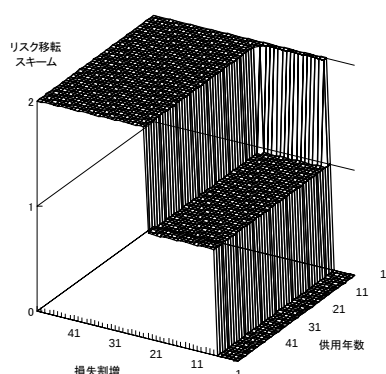


図-6 最適なリスク移転スキーム

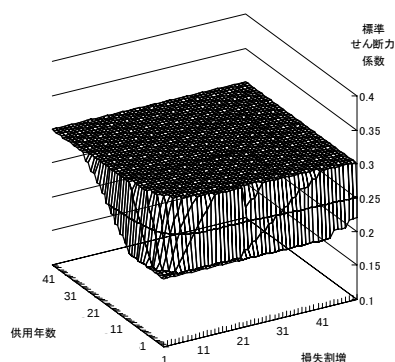


図-7 最適な耐震性能レベル

供用年数がある程度長い場合、損失割増 α が増大するにつれ、採りうる施策は、スキーム0→スキーム1→スキーム2と変わることがわかる。なお、今回の設定条件の中では、スキーム3が最適施策となることはなかった。

また、供用年数が長いほど耐震性能レベルを向上させる傾向にあり、反対に、供用年数が短い場合には耐震性能レベル向上の前にリスク移転を採用する傾向にある。これは、供用件数が短い場合には、1

年あたりの初期建設費用の増分が大きくなるため、耐震性能向上という施策が採られにくくなるからである。

4. まとめ

本研究では、地震リスクの移転を考慮した LCC 評価を取り上げ、リスク移転手法を併用した耐震性能レベルの考え方を示した。さらに、関東地域に複数の建物を有する仮定の企業を設定し、リスク移転スキームの選択や耐震性能レベルの設定に関する検討を行い、以下の結論を得た。

- 1) 供用年数により採るべきリスクマネジメント手法が異なり、供用年数が長いほど耐震性能レベルの向上が有利となり、短いほどリスク移転が有利となる。
- 2) リスク回避の傾向を表す損失割増によっても採るべき手法は異なり、割増が小さければ耐震性能レベルのみで十分であるが、割増が大きくなるに従い、地震保険との併用、証券化との併用、と手法が切り替わる。なお、供用年数によっては、地震保険が採択されない場合もある。

本研究では、地震保険と証券化をリスクコントロール手法である耐震性能レベルの向上と組み合わせ、LCC 評価ならびにリスクマネジメント手法を検討した。現実には、地震保険がカバーできない領域を証券化がカバーする等、その組み合わせ方も多様である。本研究で示した例は単純なものであるが、これを現実的な問題に展開することは容易である。今後は、より現実的な組み合わせや組み合わせの最適化について検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 新建築構造体系の開発 目標水準分科会報告書, 建設省建築研究所, 1998.3
- 2) 中村紀吉, 成川匡文, 岸野泰章, 福島誠一郎, 岩田衛, 和田章: 特殊用途建築物に適用可能な機能に基づく耐震設計の考え方, 日本建築学会構造系論文集, No.511, pp.149-156, 1998.9
- 3) 福島誠一郎, 矢代晴実: 地震ポートフォリオ解析による多地点に配置された建物群のリスク評価, 日本建築学会計画系論文集, No.552, pp.169-176, 2002.2
- 4) 福島誠一郎, 矢代晴実: リスク移転を考慮した耐震性能レベル設定の考え方, 日本建築学会構造系論文集, No.567, pp.197-204, 2003.5
- 5) 福島誠一郎, 矢代晴実: 地震リスクの証券化における条件設定に関する解析, 日本建築学会計画系論文集, No.555, pp.295-302, 2002.5

(2003. 9. 11 受付)